干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

新疆典型沙漠和绿洲植被-水汽-地表温度相关性分析

程丹妮[1]， 王颖琪[1]， 程勇翔[1]， 黄敬峰[2]

（1. 石河子大学生命科学学院，新疆 石河子 832000；
2. 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所，浙江 杭州 310058）

摘 要：为探讨新疆不同区域沙漠、绿洲地表温度（Land surface temperature，LST）、归一化植被指数（Normalized difference vegetation index，NDVI）及大气水汽含量三者间的相关关系，利用2001—2019年MOD13C3植被指数、MOD11C3地表温度以及2013—2017年Suomi NPP VIIRS水蒸气含量数据，运用Slope趋势分析方法对该问题进行研究。结果表明：（1）2001—2019年新疆植被指数年平均值整体呈增加趋势，绿洲增加尤为明显。地表温度年平均值变化为绿洲白天减少、夜晚增加，年温度差值减少；沙漠白天夜晚均增加，年温度差值增加。（2）全疆的NDVI、大气水汽含量及地表温度三者的月值数据彼此呈正相关关系。植被增加可减少地表温差和大气水汽差，在北疆绿洲的高植被覆盖区表现明显。绿洲对于生态环境的调控作用优于沙漠，北疆绿洲调控作用优于南疆。（3）塔克拉玛干沙漠在每年3—10月夜晚地表逆温和逆湿现象明显，导致夜晚大气水汽含量高于白天。南疆绿洲受沙漠环境及植被增加的双重影响，近年来夜晚水汽含量高于白天水汽含量的月份逐渐减少，主要集中在夏季。研究结果有利于从宏观层面认识新疆气候变化，为新疆生态环境保护提供有价值的参考。

关 键 词：植被指数；地表温度；大气水汽含量；逆温；逆湿
文章编号：

地区植被的变化能够直接反映出该地环境变化[1]。植被在调节气候[2]，维持地球表面环境稳定[3]中起着重要作用。归一化植被指数（NDVI）能很好的反映地区植被的变化和覆盖程度[3]，已被广泛用于研究植物时空变化和生态环境监测[4-5]。NDVI与地表温度[6]和大气水汽含量[7]关系密切，植被覆盖度越高对于地表温度的调控作用就会越强，对大气水汽的调控效果越好[8]。

蔡朝朝等[2]利用2000—2018年NDVI月值合成数据集，通过趋势分析，得出新疆沿天山绿洲带植被有明显增加趋势。王丽平等[6]基于2003—2018年MODIS地表温度产品，使用地表温度最大值，采用长时间序列趋势分析得出新疆塔里木盆地以及新疆北部地表温度呈现明显上升趋势。雷磊等[8]利用Landsat TM影像以及于田地区气象站的日地表温度数据，得出植被覆盖度的增加，对于地表温度上升变缓起着重要作用。杨青等[9]对伊犁河流水汽含量做了相关研究，得出了在研究区水汽含量集中在夏季；姚俊强等[10]利用气象站观测数据结合探空站观测资料对天山山区及周边地区的水汽含量进行了特征分析，得出水汽含量呈现明显的季节变化，夏季最高、冬季最小。此外，还有不少学者，分别对于新疆石河子地表温度[11]、天山植被[12]、和田地区植被变化[13]等局部地区做过研究，得出具有参考价值的研究结果，结果显示上述地区植被呈现增加趋势，夏季地表温度下降明显。

经文献查询，目前对新疆沙漠、绿洲各系统间的比较研究较少，对南北疆各系统植被-水汽-地表温度相关性分析更鲜有报道。因此，本文通过对新疆沙漠、绿洲典型生境的选取，对比南北疆沙漠、绿

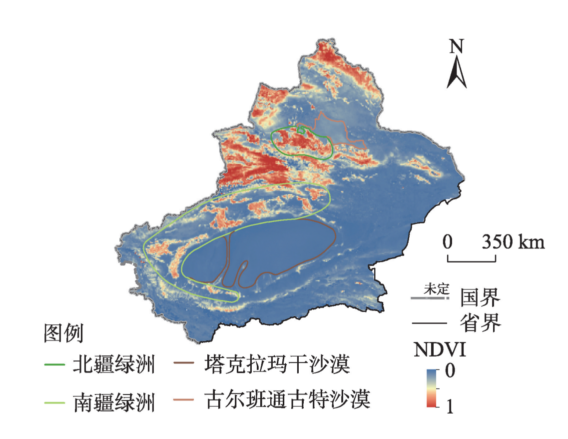
收稿日期：2021-06-07； **修订日期**：2021-09-29
基金项目：欧盟Erasmus+项目（598838-EPP-1-2018-EL-EPPKA2-CBHE-JP）资助
作者简介：程丹妮（2000-），女，本科生，主要从事生态学研究. E-mail: 2105237429@qq.com
通讯作者：程勇翔（1981-），男，副教授，主要从事植被与生态遥感、生态工程研究. E-mail: chengyongxiang613@163.com

洲植被指数、大气水汽含量、地表温度变化特征，揭示在当前环境变化背景下三者间的内在联系，为更好地认识新疆生态环境变化提供有价值的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新疆地处欧亚大陆腹地，远离海洋，属于典型温带大陆性气候[14]。天山山脉将新疆分为北疆和南疆，在北疆有固定、半固定古尔班通古特沙漠，植被覆盖度在30%左右。南疆有流动性塔克拉玛干沙漠，植被覆盖度几乎为零（图1）。海拔高度是北疆低于南疆[15]，降水是北疆多于南疆[16]，植被是北疆整体好于南疆[17]。由于南北疆显著的气候差异，造就了彼此生态环境的巨大差异，因此具有较高的探索、比较和研究价值。



注：该图基于新疆维吾尔自治区自然资源厅标准地图服务网站下载的审图号为新S(2021)023号的标准地图制作，底图边界无修改。NDVI数据覆盖区域为标准地图边界裁剪所得。下同。

图1 新疆典型生境选取示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical habitat selection in Xinjiang

1.2 数据与处理

2001—2019年MOD13C3植被指数及MOD11C3地表温度数据空间分辨率均为5.5 km，时间分辨率为月。2013—2017年Suomi NPP VIIRS水汽数据空间分辨率为0.5°，时间分辨率为月。研究从NASA官网（https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov）下载获取了上述数据。利用MOD13C3、MOD11C3各自数据质量信息，对数据进行了去云处理，并结合质量信息，对于有气溶胶影响的像元也进行处理，确保后续参与运算的数据准确可靠。研究利用交互式数据语言（Interactive data language，IDL）编程读取NC格式的水汽产品，并将该数据转换成遥感图像处理软件ENVI支持的TIF格式。选取以VIIRS为基础，并加入NUCAPS（美国国家海洋和大气管理局CrIS/ATMS处理系统）水汽积来补偿VIIRS水汽通道缺失的水汽总量（TPW）产品，获取白天、夜晚全球月平均值用于研究。利用图1各典型生境矢量图获取研究所需数据。

1.3 研究方法

研究采用Slope斜率公式对2001—2019年NDVI、地表温度年平均值序列变化进行趋势分析，斜率计算公式为：

$$\text{Slope}=\frac{n\times\sum_{j=1}^{n}j\times x_j-\left(\sum_{j=1}^{n}j\right)\left(\sum_{j=1}^{n}x_j\right)}{n\times\left(\sum_{j=1}^{n}j^2\right)-\left(\sum_{j=1}^{n}j\right)^2} \tag{1}$$

式中：j为年份；x_j为第j年NDVI或地表温度的年平均值；n为总年数。当Slope>0时，表示研究因子在n年中变化为上升趋势；当Slope<0时，表示研究因子在n年中变化为下降趋势。

2 结果与分析

2.1 新疆NDVI变化趋势

从NDVI趋势变化分析结果（图2）可知，新疆绿洲植被增加显著。研究分析，绿洲植被的增加与盐碱地的改良和农田开发密切相关。一方面，受新疆农业生产模式转变的影响，特别是滴灌影响，使得灌头下土壤水分接近饱和，水分扩散后形成一个半圆锥形的土壤浸润体，土壤盐分随水移动后，盐被淋洗到浸润体的外围，结果导致土壤耕作层盐分下

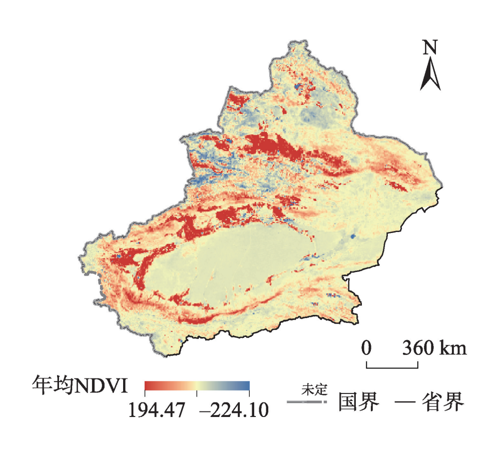


图2 年均NDVI趋势

Fig. 2 Trend of annual NDVI

降[18-19],促进了农作物生长,大面积盐渍化土地被充分利用。另一方面,滴灌提高了水分利用效率,耕地面积明显增加。受近年来区域降水增加的影响,新疆自然植被整体呈增加趋势,但在伊犁、塔城和阿勒泰部分地区植被却有所减少,特别是伊犁地区的植被下降明显。学者研究表明,伊犁地区植被的下降与该区人口的增加、人类对自然环境的干扰[20]、夏季超载过牧[21]、降水减少[22]以及外来植物入侵等关系密切[23]。

2.2 新疆地表温度变化趋势

从地表温度趋势分析(图3)可见,在植被明显增加的绿洲,白天地表温度明显下降,夜晚地表温度明显上升,昼夜地表温差降低。这表明植被增加对地表温度具有调控作用,可使地表温度变幅减小。受全球气候变暖的影响,在古尔班通古特沙漠、塔克拉玛干沙漠等低植被覆盖的区域,白天和夜晚地表温度均升高,昼夜地表温差增加。虽然两大沙漠近年植被略有增加,但稀疏的植被对温度调控作用弱,沙漠地表温度变化更多受下垫面状况和气温变化所控制。上述分析表明,高植被覆盖区比低植被覆盖区对地表温度变化的调控作用强。

2.3 新疆整体植被-水汽-地表温度相关性

NDVI、地表温度与大气水汽含量两两相互关系表现为:植被增加,白天、夜晚大气水汽含量都增加,水汽差值增加(图4a)。伴随着植被指数增加,白天、夜晚地表温度增加,当植被指数最大时,即夏季昼夜地表温差逐渐减小(图4b)。比较植被增加对地表温差和水汽差变化的影响可得出,地表温度对植被变化的敏感度高,而大气水汽含量对植被变化的敏感度低,即在全疆水平上,平均较低的植被覆盖不能有效降低水汽差。另外,地表温度增加,白天、夜晚大气水汽含量都增加,且昼夜地表温差越大,水汽含量差值也越大(图4c)。

2.4 北疆沙漠和绿洲植被-水汽-地表温度相关性

在北疆古尔班通古特沙漠,植被、大气水汽含量和地表温度均有明显的季节变化。大气水汽含量和地表温度及各差值每年夏季均达到一年中的最大值,冬季为最低值(图5a~c)。白天大气水汽含量和地表温度均高于夜晚(图5a~b、表1)。NDVI峰值出现在每年的春季(图5d)。由于古尔班通古特沙漠植被覆盖度低,调控作用弱,每年随沙漠植被增加地表温度差和水汽差未减小(图6a~b)。地表

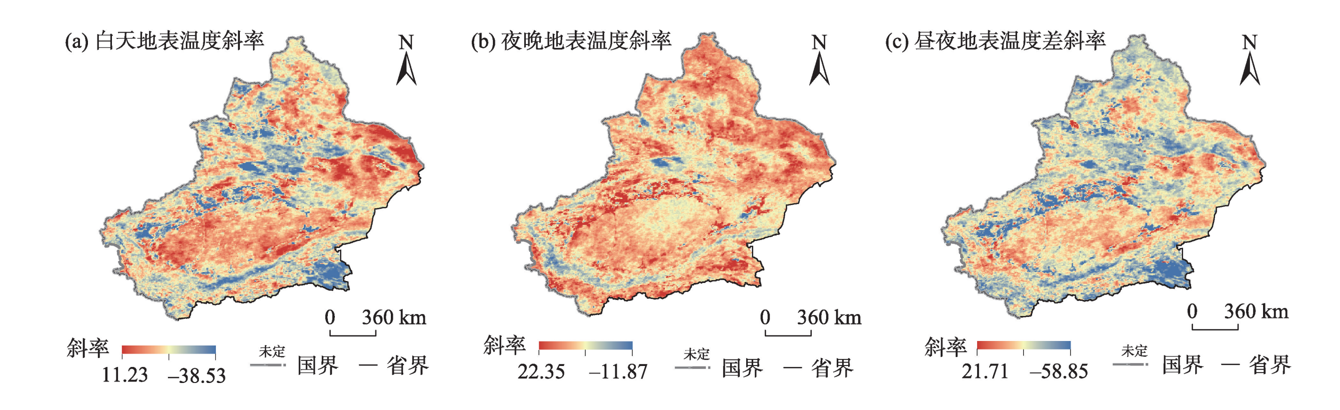


图3 地表温度斜率趋势分析

Fig. 3 Slope trends of land surface temperature

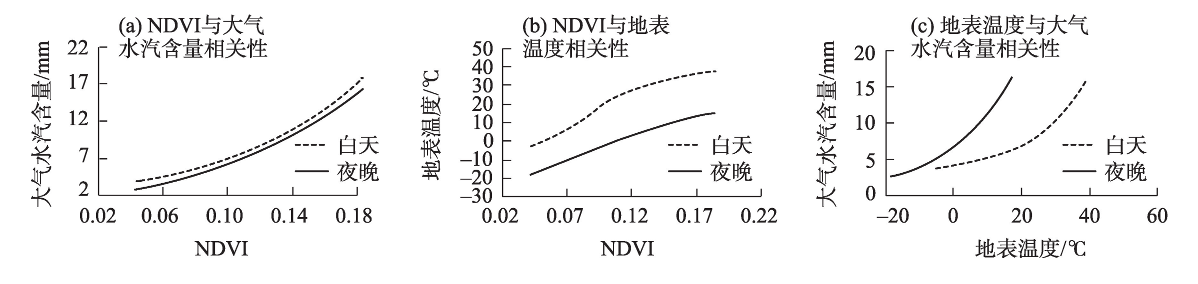


图4 NDVI、地表温度与大气水汽含量相关性

Fig. 4 Correlations between NDVI, land surface temperature and atmospheric water vapor content

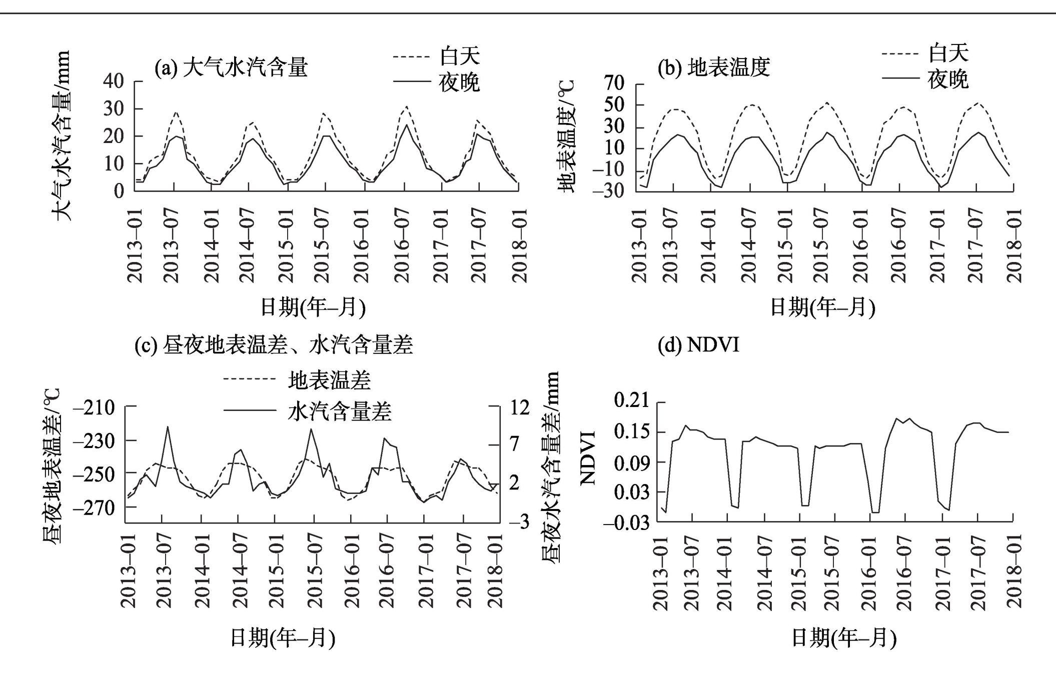


图5　2013—2017年北疆古尔班通古特沙漠生态指标变化

Fig. 5　Changes of ecological indicators of Gurbantunggut Desert in northern Xinjiang from 2013 to 2017

表1　2013—2017年北疆生态指标情况

Tab. 1　Ecological indicators situation of northern Xinjiang from 2013 to 2017

位置	指标	时间	平均值	最大值	最小值
北疆	NDVI		0.17	0.34	0.00
	地表温度/℃	白天	15.71	39.55	-13.10
		夜晚	-0.68	18.44	-24.29
	大气水汽含量/mm	白天	10.22	22.92	2.75
		夜晚	8.40	18.85	2.44
古尔班通古特沙漠	NDVI		0.11	0.18	-0.01
	地表温度/℃	白天	20.87	52.19	-17.82
		夜晚	1.37	24.41	-26.63
	大气水汽含量/mm	白天	13.25	31.15	3.47
		夜晚	10.60	24.13	3.04
绿洲区	NDVI		0.29	0.68	0.00
	地表温度/℃	白天	16.09	39.13	-17.32
		夜晚	0.59	20.20	-26.98
	大气水汽含量/mm	白天	12.31	25.80	3.17
		夜晚	10.81	22.42	3.19

注:NDVI为归一化植被指数。下同。

温度对大气水汽含量影响明显(图6c)。

在北疆绿洲受高植被覆盖的影响,地表温度差和水汽差,均较相邻古尔班通古特沙漠小(图7a~c),且每年随植被增加水汽含量差和地表温度差均减少(图8a~b),这充分体现出植被对环境的调控作用及绿洲效应。绿洲由于大部分为农作物,NDVI峰值出现在夏季(图7d)。大气水汽含量受地表温度的影响明显(图8c)。

2.5　南疆沙漠和绿洲植被-水汽-地表温度相关性

在南疆塔克拉玛干沙漠,白天地表温度明显高于夜晚(表2),昼夜地表温差巨大(图9b),大气水汽含量在每年3—10月会出现夜晚水汽含量超过白天水汽含量的现象(图9a、c),分析原因与春、夏、秋季沙漠夜晚逆温、逆湿现象关系密切。塔克拉玛干沙

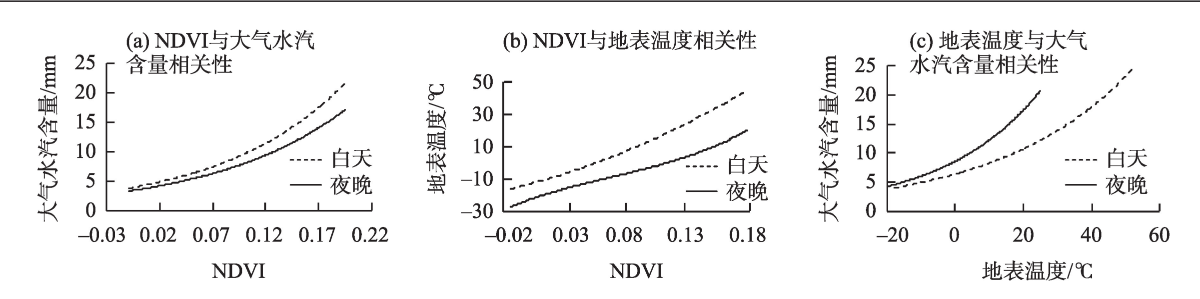


图6 北疆古尔班通古特沙漠植被-水汽-地表温度相关性

Fig. 6 Correlations between vegetation, water vapor and land surface temperature in Gurbantunggut Desert of northern Xinjiang

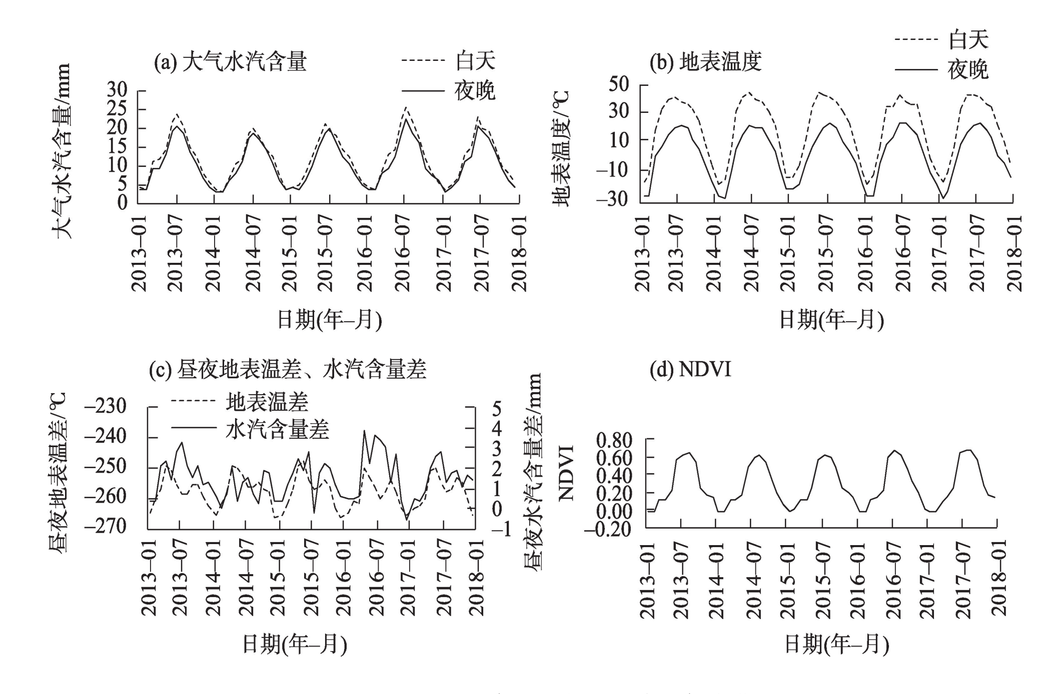


图7 2013—2017年北疆绿洲生态指标变化

Fig. 7 Changes of ecological indicators of oasis in northern Xinjiang from 2013 to 2017

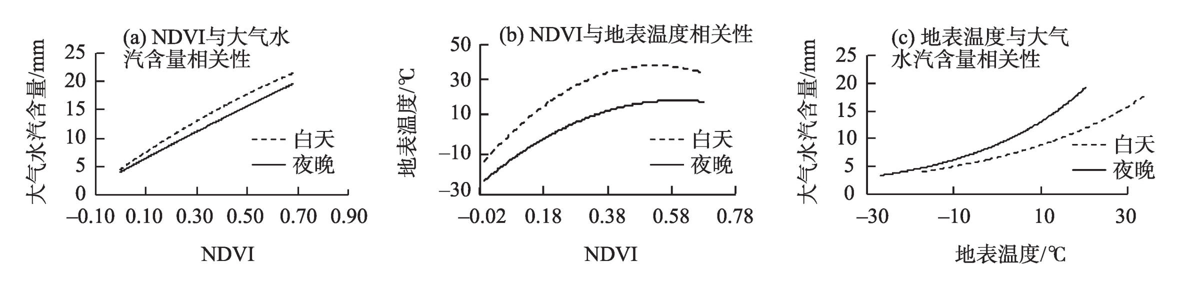


图8 北疆绿洲植被-水汽-地表温度相关性

Fig. 8 Correlations between vegetation, water vapor and land surface temperature in oasis of northern Xinjiang

漠由于缺少植被调控，升温快，降温也快。夜晚地表因辐射冷却造成最接近地面的下层空气迅速降温，而上层的空气冷却降温较慢，因而使下层大气的气温低于上层大气的气温，出现逆温状态。在逆温层底部有大量的水汽堆积，在空中形成明显的逆湿层，因湍流交换弱，整个大气基本为稳定层结，而在白天，地表温度升高，整个大气变为不稳定层结，逆湿就会减弱，所以塔克拉玛干沙漠在气温较高的月份会出现反常的夜晚水汽含量高于白天水汽含量的情况。此外，极低覆盖度下的植被变化(图9d)对地表温度变化几乎无调控。地表温度对大气水汽含量的增加影响显著，夜晚相较于白天水汽含量

表2　2013—2017年南疆生态指标情况

Tab. 2　Ecological indicators situation of southern Xinjiang from 2013 to 2017

位置	指标	时间	平均值	最大值	最小值
南疆	NDVI		0.08	0.13	0.00
	地表温度/℃	白天	21.46	40.51	−2.48
		夜晚	−0.44	15.85	−18.15
	大气水汽含量/mm	白天	8.12	20.39	3.42
		夜晚	7.62	17.24	2.49
塔克拉玛干沙漠	NDVI		0.05	0.06	0.05
	地表温度/℃	白天	31.32	51.72	0.63
		夜晚	4.91	23.43	−16.24
	大气水汽含量/mm	白天	9.47	29.69	4.43
		夜晚	10.46	24.27	3.14
绿洲区	NDVI		0.33	0.62	0.13
	地表温度/℃	白天	20.00	34.78	−0.47
		夜晚	4.02	19.26	−15.04
	大气水汽含量/mm	白天	10.62	23.28	4.26
		夜晚	10.36	20.58	3.29

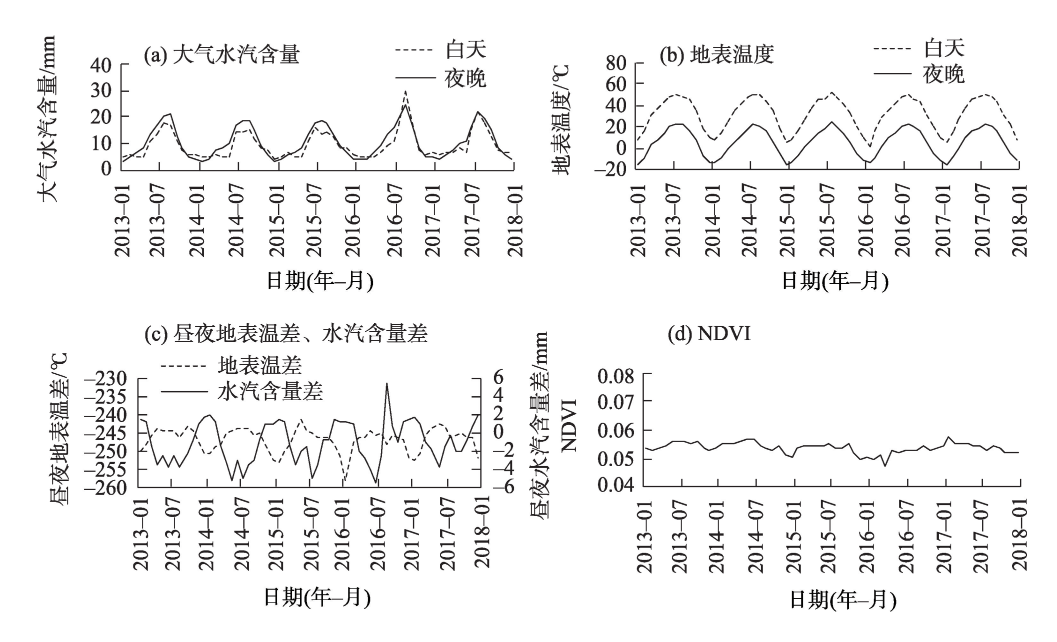


图9　2013—2017年南疆塔克拉玛干沙漠生态指标变化

Fig. 9　Changes of ecological indicators in Taklimakan Desert of southern Xinjiang from 2013 to 2017

受温度调控更明显(图10c)。

在南疆绿洲,受高植被覆盖影响,昼夜地表温差明显降低(图11b~c),表现为与北疆绿洲相同的特性,即每年随植被增加地表温度差减少(图12b)。但大气水汽含量变化与北疆绿洲不同,南疆绿洲受外围沙漠环境影响巨大,也会出现夜晚大气水汽含量超过白天大气水汽含量的现象,但月份却主要集中在夏季(图11a、图12a)。以上分析再次表明植被变化对地表温度的影响强于对水汽的影响。地表温度对大气水汽含量的控制明显(图12c)。

3　讨 论

研究所得新疆NDVI呈明显增加趋势与周紫燕等[24]研究结果基本一致。新疆绿洲NDVI增加显著与Yuan等[25]利用MOD13Q1数据对2000—2018年

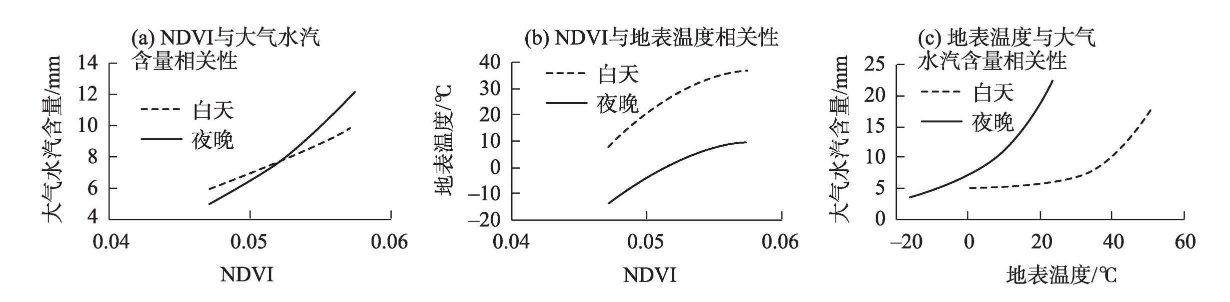


图10 南疆塔克拉玛干沙漠植被-水汽-地表温度相关性

Fig. 10 Correlations between vegetation, water vapor and land surface temperature in Taklimakan Desert of southern Xinjiang

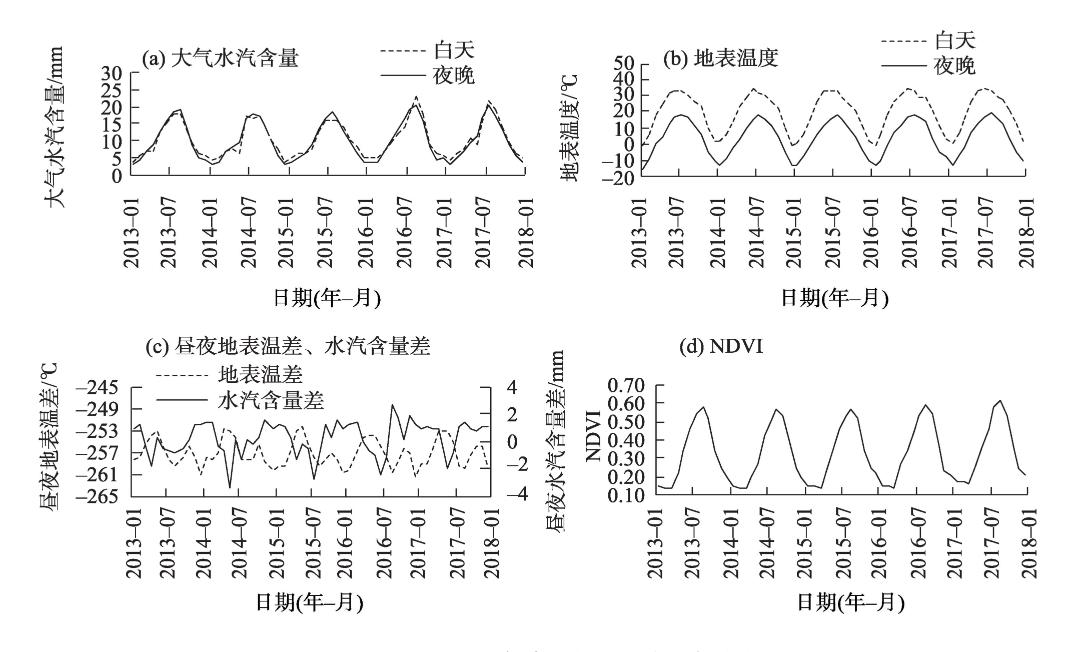


图11 2013—2017年南疆绿洲生态指标变化

Fig. 11 Changes of ecological indicators of oasis in southern Xinjiang from 2013 to 2017

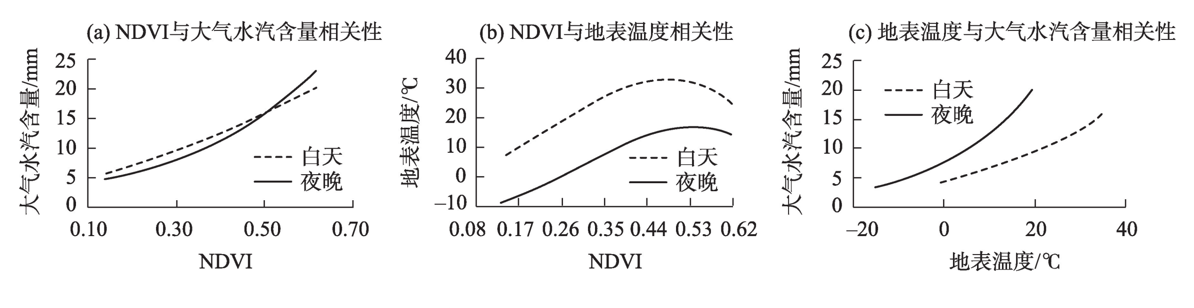


图12 南疆绿洲植被-水汽-地表温度相关性

Fig. 12 Correlations between vegetation, water vapor and land surface temperature in oasis of southern Xinjiang

中国西部植被生长季新疆绿洲呈现明显增加趋势的研究结果一致,与Dong等[26]所得近年来南北疆绿洲面积快速增加相吻合。新疆地表温度的趋势变化研究结果与韩春光等[11,27]的研究结果相似。新疆荒漠地表温度呈上升趋势,绿洲呈下降趋势,与胡云锋等[28]的研究结果一致。从划分的不同下垫面来看,耕地NDVI上升明显,其地表温度会因植被覆盖度增加呈明显下降趋势,而沙漠因植被稀疏,地表温度变化受植被影响较小,NDVI与地表温度呈现正相关,与热伊莱·卡得尔等[29]的研究结果一致。经计算塔克拉玛干沙漠2013—2017年的平均地表温度高于古尔班通古特沙漠,这与赵强等[30]研

究结果近似。研究得出塔克拉玛干沙漠的白天、夜晚的地表温度均高于古尔班通古特沙漠(表1、表2),其白天、夜晚的平均地表温度分别为31.32 ℃、4.91 ℃,而古尔班通古特沙漠的白天、夜晚平均地表温度分别20.87 ℃、1.37 ℃。

Wang等[7]研究得出随着NDVI的增加,大气水汽含量与NDVI的相关性也越来越强,两者呈现正相关关系,该结果与研究所得植被覆盖增加对水汽含量的影响程度增加相一致。2013—2017年北疆白天、夜晚平均水汽含量分别为10.22 mm和8.40 mm,均大于南疆白天、夜晚8.12 mm和7.62 mm的平均水汽含量(表1、表2),且有明显的年变化,夏季水汽含量最大,与张扬等[31]的研究结果一致。水汽含量会明显受到下垫面的影响,因绿洲农田灌溉和作物生长蒸发、蒸腾作用大,导致大气水汽含量高,而在沙漠因降水少、植被覆盖度低,大气水汽含量相对于绿洲低[32]。南疆耕地因作物生长导致植被覆盖相对于沙漠高,保证了水汽含量,所以南疆耕地的水汽含量总体大于塔克拉玛干沙漠[33]。研究所得NDVI呈现明显增加趋势的地区大部分是新疆早熟棉种植区,植被覆盖度高于沙漠,呈下降趋势的昼夜地表温差明显不同于沙漠[34-35]。魏浩林等[36-38]所得地表温度增加,大气水汽含量升高,且两者呈正相关的结论与研究结果一致。

北疆白天水汽含量高于夜晚水汽含量,符合水汽变化的一般规律,即温度越高水汽含量越高。南疆沙漠在3—10月表现为夜晚高于白天,不符合水汽变化的一般规律,分析出现这种异常的原因与塔克拉玛干沙漠植被覆盖度低[39]、降水少[40]密切相关。沙漠白天经过太阳照射,地表温度高,到了夜晚地表会通过长波形式向空气中散热[41]。南北疆沙漠相比较,北疆沙漠因有植被覆盖,植被会对地表温度变化起一定调控作用,导致地表温度不会迅速下降,逆温、逆湿现象不明显。南疆沙漠由于基本无植被覆盖,夜晚地表会迅速冷却降温,逆温、逆湿现象明显,导致夜晚逆温层底部有大量的水汽堆积,水汽含量高于白天[42-44]。崔丽娜等[45]基于塔中站地基全球定位系统(GPS)观测的大气水汽含量数据,对塔克拉玛干沙漠腹地的水汽含量日变化特征进行了研究,得出沙漠腹地全年夜晚水汽含量均高于白天水汽含量,该结论与研究结果在时间上略有不同。分析差异原因主要与所采用的数据和研究手段不同有关,具体问题还有待深入研究。

4 结 论

2001—2019年新疆植被整体增加,局部减少,绿洲植被增加最为明显。新疆植被明显增加,白天地表温度降低,夜晚地表温度升高,地表温差减少,环境变得更加稳定。植被增加大气水汽含量也增加,两者呈正相关关系。植被对水汽含量的调控作用在高植被覆盖的绿洲才体现较为明显。植被对地表温度的影响强于对大气水汽含量的影响。植被增加有助于降低地表温差和水汽含量差。塔克拉玛干沙漠3—10月夜晚水汽含量高于白天水汽含量。南疆绿洲受近年植被增加和塔克拉玛干沙漠的双重影响,绿洲主要在夏季出现夜晚水汽含量高于白天水汽含量的现象。提高新疆植被覆盖度将有利于应对全球气候变化。

参考文献(References)

[1] 潘黄儒, 冯鹏飞, 李凡. 基于MODIS数据的中国西北植被变化分析[J]. 林业科技通讯, 2019, 564(12): 3-8. [Pan Huangru, Feng Pengfei, Li Fan. Analysis of vegetation change in northwest China based on MODIS data[J]. Forest Science and Technology, 2019, 564(12): 3-8.]

[2] 蔡朝朝, 淮永建, 白涛, 等. 基于NDVI的新疆草地覆盖变化特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(6): 1369-1381. [Cai Zhaozhao, Huai Yongjian, Bai Tao, et al. Recent changes of grassland cover in Xinjiang based on NDVI analysis[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(6): 1369-1381.]

[3] 王建国, 张飞. 2000—2019年新疆植被覆盖度时空格局及重心变化分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 188-194. [Wang Jianguo, Zhang Fei. Spatial-temporal pattern and gravity center change of fractional vegetation cover in Xinjiang, China from 2000 to 2019 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(20): 188-194.]

[4] 陈晨, 王义民, 黎云云, 等. 黄河流域1982—2015年不同气候区植被变化规律及其影响因素[J]. 长江科学院院报. [2021-09-23]. http: //kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20210511.1449.005.html. [Chen Chen, Wang Yimin, Li Yunyun, et al. Vegetation changes and influencing factors in different climatic regions of the Yellow River Basin from 1982 to 2015[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute. [2021-09-23]. http: //kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20210511.1449.005.html.]

[5] 姚镇海, 吴丹娃, 褚荣浩, 等. 安徽省植被覆盖度动态变化及其地形响应关系[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 283-290. [Yao

Zhenhai, Wu Danwa, Chu Ronghao, et al. Dynamic change of vegetation coverage and its respone to topography in Anhui Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 283-290.]

[6] 王丽平, 段四波, 张霄羽, 等. 2003—2018年中国地表温度年最大值的时空分布及变化特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1299-1308. [Wang Liping, Duan Sibo, Zhang Xiaoyu, et al. Spatio-temporal distribution and variation characteristics of annual maximum land surface temperature in China during 2003—2018 [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1299-1308.]

[7] Wang Z, Huang M, Wang R, et al. Global NDVI patterns in response to atmospheric water vapor anomalies over the Indo-Pacific warm pool during April-June[J]. Journal of Climate, 2019, 32(4): 1167-1180.

[8] 雷磊, 塔西甫拉提·特依拜, 李金香, 等. 干旱区典型绿洲地表温度与植被覆盖度相关性研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 1001-1007. [Lei Lei, Tiyip Tashpolat, Li Jinxiang, et al. Correlation between land surface temperature and vegetation coverage in a typical arid oasis[J]. Jouranl of Desert Research, 2011, 31(4): 1001-1007.]

[9] 杨青, 姚俊强, 赵勇, 等. 伊犁河流域水汽含量时空变化及其和降水量的关系[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1174-1183. [Yang Qing, Yao Junqiang, Zhao Yong, et al. Spatial and temporal variation of water vapor content and its relationship with precipitation in the Yili River Basin[J]. Jouranl of Desert Research, 2013, 33 (4): 1174-1183.]

[10] 姚俊强, 杨青, 黄俊利, 等. 天山山区及周边地区水汽含量的计算与特征分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 567-573. [Yao Junqiang, Yang Qing, Huang Junli, et al. Computation and analysis of water vapor content in the Tianshan Mountains and peripheral regions, China[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(4): 567-573.]

[11] 韩春光, 蒲云锦. 新疆石河子多年地温和降水特征分析[J]. 新疆农垦科技, 2020, 43(8): 38-39. [Han Chunguang, Pu Yunjin. Analysis on characteristics of mild-temperature precipitation in Shihezi, Xinjiang[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2020, 43(8): 38-39.]

[12] 齐亚霄, 张飞, 陈瑞, 等. 2001—2015年天山北坡植被覆盖动态变化研究[J]. 生态学报, 2020, 40(11): 3677-3687. [Qi Yaxiao, Zhang Fei, Chen Rui, et al. Vegetation coverage dynamics in northern slope of Tianshan Mountains from 2001 to 2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(11): 3677-3687.]

[13] 努尔麦麦提·如孜, 王雪梅. 新疆和田地区土地荒漠化时空特征分析[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(7): 870-878. [Ruzi Nuermaimaiti, Wang Xuemei. Analysis on the characteristics of spatial and temporal changes for land desertification in Hotan area, Xinjiang[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36 (7): 870-878.]

[14] 冯金杰, 张辉国, 胡锡健, 等. 降水量和温度对植被覆盖指数影响的空间非平稳性特征——以新疆伊犁河谷地区为例[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4626-4634. [Feng Jinjie, Zhang Huiguo, Hu Xijian, et al. Spatial non-stationarity characteristics of the impacts of precipitation and temperature on vegetation coverage index: A case study in Yili River Valley, Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4626-4634.]

[15] 姜萍, 丁文广, 肖静, 等. 新疆植被NPP及其对气候变化响应的海拔分异[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 849-857. [Jiang Ping, Ding Wenguang, Xiao Jing, et al. Altitudinal difference of vegetation NPP and its response to climate change in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 849-857.]

[16] 左其亭, 李佳伟, 马军霞, 等. 新疆水资源时空变化特征及适应性利用战略研究[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 21-27. [Zuo Qiting, Li Jiawei, Ma Junxia, et al. Study on spatio-temporal variation characteristics and adaptive utilization strategy of water resources in Xinjiang[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 21-27.]

[17] 张晋霞, 徐长春, 杨秋萍. 2001—2017年新疆NDVI变化及其对极端气候的响应[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 250-256, 275, 341. [Zhang Jinxia, Xu Changchun, Yang Qiuping. NDVI variations and its response to extreme climate in Xinjiang Uygur Autonomous Region during 2001—2017[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 250-256, 275, 341.]

[18] 祁通, 黄建, 孙阳讯, 等. 滴灌条件下盐渍土盐分淡化区形成过程中离子运移特征[J]. 土壤与作物, 2021, 10(1): 47-59. [Qi Tong, Huang Jian, Sun Yangxun, et al. Characteristics of salt ion transport during the period of low salt area development in saline soil under drip irrigation[J]. Soil and Crops, 2021, 10(1): 47-59.]

[19] 朱珠, 王世昌, 文豪, 等. 地下滴灌土壤湿润体内水盐空间分布规律[J]. 塔里木大学学报, 2021, 33(1): 92-97. [Zhu Zhu, Wang Shichang, Wen Hao, et al. Spatial distribution of water and salt under subsurface drip irrigation[J]. Journal of Tarim University, 2021, 33(1): 92-97.]

[20] 闫俊杰, 张静, 雷雨, 等. 2000—2016年新疆伊犁河谷草地NDVI变化趋势分析[J]. 草地学报, 2018, 26(4): 859-868. [Yan Junjie, Zhang Jing, Lei Yu, et al. Analysis of the changing trend of grassland NDVI in the Ili Valley of Xinjiang during 2000—2016 [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(4): 859-868.]

[21] 刘芳, 张红旗, 董光龙. 伊犁河谷草地植被NDVI变化及其降水敏感性特征[J]. 资源科学, 2014, 36(8): 1724-1731. [Liu Fang, Zhang Hongqi, Dong Guanglong. Vegetation dynamics and precipitation sensitivity in Yili Valley grassland[J]. Resources Science, 2014, 36(8): 1724-1731.]

[22] 何辉, 玉素甫江·如素力. 2001—2015年伊犁地区植被NDVI变化及其影响因子的相对作用分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 76-87. [He Hui, Rusuli Yusupujiang. Analysis of the relative role of vegetation cover changes and its influencing factors in Yili area from 2001 to 2015[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(10): 76-87.]

[23] 李璇, 加马力丁, 付开, 等. 外来入侵植物豚草、三裂叶豚草对新疆伊犁河谷草原的危害现状及防控对策[J]. 新疆畜牧业,

2020, 35(6): 33, 41-43. [Li Xuan, Jiamaliding, Fu Kai, et al. The status and control strategies of invasive plant *Artemisia artemisifolia* on grassland in Yili Valley, Xinjiang[J]. Xinjiang Xumuye, 2020, 35(6): 33, 41-43.]

[24] 周紫燕, 汪小钦, 丁哲, 等. 新疆生态质量变化趋势遥感分析[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2907-2919. [Zhou Ziyan, Wang Xiaoqin, Ding Zhe, et al. Remote sensing analysis of ecological quality change in Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2907-2919.]

[25] Yuan J, Bian Z, Yan Q, et al. An approach to the temporal and spatial characteristics of vegetation in the growing season in western China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(6): 945, doi: 10.3390/rs12060945.

[26] Dong F, Li N, Xiao G J, et al. Spatiotemporal analysis of vegetation changes along the belt and road initiative region from 1982 to 2015 [J]. IEEE Access, 2020, 8: 122579-122588.

[27] 陈笑笑, 孙必云, 华维. 西北地区年平均地表温度时空特征分析[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(23): 182-185. [Chen Xiaoxiao, Sun Biyun, Hua Wei. Analysis of spatial and temporal characteristics of annual mean surface temperature in northwest China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(23): 182-185.]

[28] 胡云锋, 张云芝, 韩月琪. 2000—2015年中国荒漠化土地识别和监测[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1321-1332. [Hu Yunfeng, Zhang Yunzhi, Han Yueqi. Identification and monitoring of desertification lands in China from 2000 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1321-1332.]

[29] 热伊莱·卡得尔, 玉素甫江·如素力, 艾则孜提约麦尔·麦麦提, 等. 典型绿洲-荒漠LST时空分异及其与NDVI的关系[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2017, 36(2): 31-39. [Kadeer Reyilai, Rusuli Yusupujiang, Maimaiti Aizezitiyuemaier, et al. Spatio-temporal differentiation of LST and its relationship with NDVI in typical desert-oasis area[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2017, 36(2): 31-39.]

[30] 赵强, 邓淑梅, 刘常瑜, 等. 超光谱红外卫星资料同步反演不同地表类型的大气廓线、地表温度和地表发射率[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(3): 693-697. [Zhao qiang, Deng Shumei, Liu Changyu, et al. Simultaneous retrieval of atmospheric profiles, surface temperature and surface emissivity in different types of earth surface using hyperspectral infrared satellite data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(3): 693-697.]

[31] 张扬, 李宝富, 陈亚宁. 1970—2013年西北干旱区空中水汽含量时空变化与降水量的关系[J]. 自然资源学报, 2018, 33(6): 1043-1055. [Zhang Yang, Li Baofu, Chen Yaning. The temporal and spatial variation of water vapor content and its relationship with precipitation in the arid region of northwest China from 1970 to 2013[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(6): 1043-1055.]

[32] 杨青, 刘晓阳, 崔彩霞, 等. 塔里木盆地水汽含量的计算与特征分析[J]. 地理学报, 2010, 65(7): 853-862. [Yang Qing, Liu Xiaoyang, Cui Caixia, et al. The computation and characteristics analysis of water vapor contents in the Tarim Basin, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(7): 853-862.]

[33] Yang Q, Wei W S, Li J. Temporal and spatial variation of atmospheric water vapor in the Taklimakan Desert and its surrounding areas[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 53(2): 71-78.

[34] 姚俊强, 毛炜峄, 陈静, 等. 新疆气候"湿干转折"的信号和影响探讨[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 57-72. [Yao Junqiang, Mao Weiyi, Chen Jing, et al. Signal and impact of wet-to-dry shift over Xinjiang, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1): 57-72.]

[35] 王灵猛, 周泽羽, 刘健, 等. 气候变化下新疆棉花调亏灌溉的节水效果评估[J]. 节水灌溉, 2021(6): 17-23, 30. [Wang Lingmeng, Zhou Zeyu, Liu Jian, et al. Evaluation of water-saving effect of cotton regulated deficit irrigation under climate change in Xinjiang [J]. Water Saving Irrigation, 2021(6): 17-23, 30.]

[36] 魏浩林. 基于MODIS数据的大气水汽含量反演研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020. [Wei Haolin. Research on inversion of precipitable water vapor based on MODIS data[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.]

[37] 赵冰, 毛克彪, 蔡玉林, 等. 中国地表温度时空演变规律研究[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 233-240. [Zhao Bing, Mao Kebiao, Cai Yulin, et al. Study of the temporal and spatial evolution law of land surface temperature in China[J]. Remote Sensing of Land and Resources, 2020, 32(2): 233-240.]

[38] 张京朋. 中国区域大气水汽变化的观测、模拟及其归因研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. [Zhang Jingpeng. Observation, simulation and attribution of atmospheric water vapor change over China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.]

[39] 蔡朝朝, 白涛, 谢岚, 等. 新疆植被覆盖度动态变化特征研究[J]. 农村经济与科技, 2020, 31(19): 11-13. [Cai Zhaozhao, Bai Tao, Xie Lan, et al. Study on dynamic change characteristics of vegetation coverage in Xinjiang[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2020, 31(19): 11-13.]

[40] 殷刚, 李兰海, 孟现勇, 等. 新疆1979—2013年降水量时空变化特征和趋势分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 19-27. [Yin Gang, Li Lanhai, Meng Xianyong, et al. A research of precipitation trend and fluctuation in Xinjiang from 1979 to 2013[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(5): 19-27.]

[41] 李可相, 肖玖军, 谢元贵, 等. 基于MODIS数据的云贵高原地表温度时空特征分析[J]. 贵州科学, 2020, 38(6): 43-48. [Li Kexiang, Xiao Jiujun, Xie Yuangui, et al. Spatio-temporal characteristics analysis of land surface temperature on Yunnan-Guizhou Plateau based on MODIS data[J]. Guizhou Science, 2020, 38(6): 43-48.]

[42] 王晶. 塔克拉玛干沙漠腹地近地层风温湿廓线观测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008. [Wang Jing. The observational study on wind speed, temperture and humidity profiles in the surface layer in Taklimaken Desert hinterland[D]. Nanjing: Nanjing

University of Information Science and Technology, 2008.]
[43] 阎宇平, 王介民, 玛·曼乃提, 等. 黑河实验区沙漠戈壁上空"逆湿"的数值模拟[J]. 气象科学, 2001, 21(1): 36–43. [Yan Yuping, Wang Jiemin, Mannaiti Ma, et al. Numerical simulation of "inverse humidtiy" over desert/gobi in HEIFE area[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2001, 21(1): 36–43.]
[44] 陈世强, 吕世华, 奥银焕, 等. 绿洲沙漠边缘逆湿的数值研究[J]. 干旱区研究, 2009, 26(2): 277–281. [Chen Shiqiang, Lü Shihua, Ao Yinhuan, et al. Numerical study on reverse humidity in the margin of oasis desert[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(2): 277–281.]
[45] 崔丽娜, 史玉光, 崔彩霞, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地2009年大气水汽含量的日变化特征[J]. 干旱气象, 2010, 28(4): 407–410. [Cui Lina, Shi Yuguang, Cui Caixia, et al. Diurnal variation of atmospheric water vapor content in 2009 over Taklimakan Desert[J]. Arid Meteorology, 2010, 28(4): 407–410.]

Vegetation-water vapor-land surface temperature correlation analysis of typical deserts and oases in Xinjiang

CHENG Danni[1], WANG Yingqi[1], CHENG Yongxiang[1], HUANG Jingfeng[2]

(1. College of Life Science, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology Application, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: To explore the correlation among the land surface temperature (LST), normalized difference vegetation index (NDVI), and atmospheric water vapor content in different regions of Xinjiang, China, the MOD13C3 NDVI and LST from 2001 to 2019 and Suomi NPP VIIRS water vapor content from 2013 to 2017 were used to study this problem using the slope trend analysis method. The results are as follows. (1) From 2001 to 2019, the annual average value of NDVI showed an overall increasing trend, especially in the oasis. The annual average change of LST is that the oasis decreases during the day and increases at night, and the annual temperature difference decreases. The desert LST increases during the day and night, and the annual temperature difference increases. (2) The monthly data of NDVI, atmospheric water vapor content, and LST are positively correlated. The increase in vegetation can reduce the surface temperature and atmospheric water vapor differences, which is obvious in the high vegetation coverage area of the oasis in northern Xinjiang. Oasis is better than the desert in regulating the ecological environment, and an oasis in northern Xinjiang is better than that in southern Xinjiang. (3) In the Taklimakan Desert, the surface temperature and humidity inversion are obvious at night from March to October every year, which lead to higher atmospheric water vapor content at night than during the day. Oasis of southern Xinjiang affected by desert environment and vegetation increase. The months when the water vapor content at night is higher than that during the day gradually decrease in recent years, mainly concentrated in summer. The research results are useful in understanding climate change from a macrolevel and providing a valuable reference for ecological environment protection in Xinjiang.

Key words: normalized difference vegetation index (NDVI); land surface temperature; atmospheric water vapor content; temperature inversion; wet inversion